

令和 2 年 7 月 3 日現在

機関番号：14602

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05443

研究課題名(和文) ハドロンの有限密度効果とQCDの対称性

研究課題名(英文) in-medium effect for hadrons and symmetries of QCD

研究代表者

永廣 秀子(Nagahiro, Hideko)

奈良女子大学・自然科学系・准教授

研究者番号：10397838

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、強い相互作用により支配されるハドロンの複雑な質量スペクトルやその相互作用を、対称性を手掛かりとして統一的に理解することを最終的な目的とし、その一環として、イータおよびイータプライム中間子原子核束縛状態の実験的な観測の実現に向けた理論研究を行ったものである。本研究により、主に束縛状態の崩壊幅について、崩壊先の粒子の特定を行うことが出来た。今後生成実験においてこの崩壊粒子を同時測定することにより、これまでの実験では大きかったバックグラウンドを大きく減らすことが可能になる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

物質の質量の大部分を占めるハドロンの性質は、いまだ明らかになっていない部分が多い。特にハドロンの質量の90%は、その構成粒子であるクォーク由来ではなく、カイラル対称性の自発的破れに伴って生成されるとされているが、この実験的検証は未だ十分ではない。本研究を通して、ハドロンの質量生成機構について明らかにすることができるかと期待される。

研究成果の概要(英文)：We investigate the formation of the eta-prime(958)-nucleus bound state to know the properties of the eta-prime meson. The eta-prime meson has a huge mass compared with other pseudo-scalar meson which is known as UA(1) anomaly.

We focus the in-medium change of the properties of the eta-prime meson and the interaction between eta-prime and nucleon and try to evaluate the effect of the partial restoration of chiral symmetry to the eta-prime system. We try to identify the possible coupled-channels to the eta-prime-nucleon system, which one can observe as a simultaneous observation at the formation of the eta-prime mesic nuclei to reduce the background in experiments.

研究分野：ハドロンの理論

キーワード：中間原子核

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

物質を構成するハドロンの性質は、強い相互作用の基礎理論である量子色力学(QCD)により支配される。しかし、現実世界に実現される現象は、クォークの閉じ込め、ハドロンの質量獲得及びそれらの複雑な質量スペクトル、エキゾチックハドロンの存在など実に多種多様である。このような多彩な現象は、複雑な非摂動的機構により実現されると考えられており、例えば、第一原理計算を行う格子 QCD などその解明の一つの手段である。一方、これに対し、相補的で重要なアプローチの一つとして、QCD の持つ対称性を手掛かりにして、複雑な機構の包括的な理解を目指すこともハドロン物理学において重要である。

### 2. 研究の目的

本研究では、中間子と原子核が構成する系に焦点を定め、そこから得られる有限密度中のハドロンの性質を、対称性の観点から記述することを目的とする。具体的には、イータおよびイータ'(958)中間子と原子核の束縛状態を出来るだけ無反跳に近い状態で生成し、原子核中でのハドロンの性質を、分光スペクトルにおけるピーク構造から探っていく。これらの中間子は同じ量子数を持ち、互いに混合する粒子であるが、核子との相互作用、有限密度中で期待される振る舞い、カイラル対称性の部分的回復に対する応答形態が異なっていると考えられている。この研究によりカイラル対称性が現実のハドロンに及ぼす多様な影響、特に対称性の回復が各粒子と原子核間ポテンシャルに与える影響についての理解を目指す。

### 3. 研究の方法

本研究では、イータおよびイータ-プライム(958)中間子原子核束縛系の質量欠損法による生成についての議論を行い、中間子原子核束縛系におけるカイラル対称性の役割の解明に関する議論を行った。その為に、《実験的検証に向けた理論体系の強化》と《実験方法の提案と議論》の二点を基軸とした。前者に対してまず、有効理論模型を用いたイータおよびイータ'(958)と核子との相互作用、励起される  $N^*$  共鳴について研究を行う。これにより、まず真空中における相互作用について、実験データを検証して現象論的に議論する。この結果を用いて、有限媒質中の理論的考察を行い、中間子原子核束縛系生成について詳細な議論を行う。

### 4. 研究成果

まず、イータプライム中間子と核子の相互作用をモデル化するために、イータ中間子を含む軽い擬スカラー中間子(パイ中間子、K 中間子、イータ中間子)と核子(ラムダバリオン、シグマバリオンを含む)との結合チャンネルの計算に、イータプライム中間子を含めることを試みた。まずは、Weinberg-Tomozawa 相互作用に、イータ-イータプライム混合を考慮することにより、イータプライム中間子核子間相互作用の導出を行った。ところが、これでは既存の実験データを説明することが出来ないことが分かった。これを説明するためには、WT 項以外のイータプライム中間子核子間相互作用が重要であることが明らかになった。我々は、この追加の相互作用として、コンタクトタイプのイータプライム中間子-核子間相互作用を導入し、この結合定数を fitting parameter として扱って、実験データを再現するために必要が結合乗数の大きさを、現象論的に

評価した。

さらに、WT 項以外の運動量の高次の項をモデルに導入することを試みた。これと並行して、ベクトル中間子をモデル空間に導入することも試みた。これら 2 つの効果は、原則的としては両者とも取り入れるべきであるが、今回はこれらを別々に考慮することを試みた。その理由は、今回我々が用いたモデルでは、それぞれのモデル空間に、未定の定数が複数個以上含まれており、両者とも同時に取り入れると、15 個以上の fitting parameter を導入することになり、何の効果も重要であるかをマスクしてしまう可能性があるからである。

今回の研究により、まず、既存の実験データと再現するためにはコンタクトタイプのイータプライム中間子-核子間相互作用にある程度の引力が必要であることを示した。さらにこの引力によりイータプライム中間子と核子の準束縛状態が出来る可能性を示した。この束縛状態は、中間子と原子核の束縛状態としても観測が可能であると考えられる。

また今回の研究により、この束縛状態が強く結合しうるチャンネルを洗い出すことが出来た。これは運動量の高次の項を取り入れた場合と、ベクトル中間子を取り入れた場合の 2 つの場合で、モデルの依存性は見られず、どちらともイータ-核子系、および K-ラムダバリオン系に強く結合することが分かった。

これらの結果により実験によりイータプライム中間子原子核を生成した際に、同時測定すべき束縛状態からの崩壊粒子が特定できたことになり、この同時測定により今後行われる実験においてバックグラウンドを減らすことが出来ると期待される。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 8件/うちオープンアクセス 0件）

|   |                               |
|---|-------------------------------|
| 1. 著者名<br>Skurzok M., Hirenzaki S., Kinutani S., Konishi H., Moskal P., Nagahiro H., Rundel O.  | 4. 巻<br>993                   |
| 2. 論文標題<br>Non-mesonic decay of the $\Lambda$ -mesic $^3\text{He}$ via $p d$ ( $^3\text{He}$ -)bound $^3\text{He}^2$ ( $6$ ) reaction | 5. 発行年<br>2020年               |
| 3. 雑誌名<br>Nuclear Physics A   | 6. 最初と最後の頁<br>121647 ~ 121647 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1016/j.nuclphysa.2019.121647   | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難  | 国際共著<br>該当する                  |
| 1. 著者名<br>Arifi Ahmad Jafar, Nagahiro Hideko, Hosaka Atsushi  | 4. 巻<br>26                    |
| 2. 論文標題<br>A Systematic Study of Charmed Baryon Decays  | 5. 発行年<br>2019年               |
| 3. 雑誌名<br>JPS Conf.Proc.  | 6. 最初と最後の頁<br>22031           |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.7566/JPSCP.26.022031   | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難  | 国際共著<br>該当する                  |
| 1. 著者名<br>Skurzok M., Moskal P., Kelkar N.G., Hirenzaki S., Nagahiro H., Ikeno N.   | 4. 巻<br>782                   |
| 2. 論文標題<br>Constraining the optical potential in the search for $\Lambda$ -mesic $^4\text{He}$  | 5. 発行年<br>2018年               |
| 3. 雑誌名<br>Physics Letters B   | 6. 最初と最後の頁<br>6 ~ 12          |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1016/j.physletb.2018.04.047  | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難  | 国際共著<br>該当する                  |
| 1. 著者名<br>Arifi A.J., Nagahiro H., Hosaka A.  | 4. 巻<br>98                    |
| 2. 論文標題<br>Three-body decay of $\Lambda_c^*(2595)$ and $\Lambda_c^*(2625)$ with the inclusion of a direct two-pion coupling           | 5. 発行年<br>2018年               |
| 3. 雑誌名<br>Physical Review D   | 6. 最初と最後の頁<br>114007-1 ~ -11  |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1103/PhysRevD.98.114007  | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難  | 国際共著<br>該当する                  |

|   |                         |
|---|-------------------------|
| 1. 著者名<br>Khemchandani Kanchan, Hosaka A., Nagahiro H., Navarra F. S., Nielsen M., Martinez Torres A. | 4. 巻<br>2017            |
| 2. 論文標題<br>Understanding the properties of $\Xi(1690)$ and $\Xi(2120)$                                | 5. 発行年<br>2018年         |
| 3. 雑誌名<br>PoS Hadron2017  | 6. 最初と最後の頁<br>056-1 ~ 5 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.22323/1.310.0056   | 査読の有無<br>無              |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難  | 国際共著<br>該当する            |

|   |                             |
|---|-----------------------------|
| 1. 著者名<br>Tanaka Y. K, et al  | 4. 巻<br>97                  |
| 2. 論文標題<br>Missing-mass spectroscopy of the $C12(p,d)$ reaction near the $\rho$ -meson production threshold | 5. 発行年<br>2018年             |
| 3. 雑誌名<br>Physical Review C   | 6. 最初と最後の頁<br>015202-1, -13 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1103/PhysRevC.97.015202  | 査読の有無<br>有                  |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難  | 国際共著<br>該当する                |

|   |                            |
|---|----------------------------|
| 1. 著者名<br>A.J. Arifi, H. Nagahiro, A. Hosaka  | 4. 巻<br>95                 |
| 2. 論文標題<br>Three-Body Decay of $\Lambda_c(2595)$ and $\Lambda_c(2625)$ with consideration of $\Sigma_c(2455)\pi$ and $\Sigma_c(2520)\pi$ in intermediate States | 5. 発行年<br>2017年            |
| 3. 雑誌名<br>Physical Review D   | 6. 最初と最後の頁<br>114018-1, -9 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1103/PhysRevD.95.114018  | 査読の有無<br>有                 |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難  | 国際共著<br>該当する               |

|   |                             |
|---|-----------------------------|
| 1. 著者名<br>K.P. Khemchandani, A. Martinez Torres, A. Hosaka, H. Nagahiro, F.S. Navarra, M. Nielsen | 4. 巻<br>97                  |
| 2. 論文標題<br>Why $\Xi(1690)$ and $\Xi(2120)$ are so narrow?   | 5. 発行年<br>2018年             |
| 3. 雑誌名<br>Physical Review D   | 6. 最初と最後の頁<br>034005-1, -18 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1103/PhysRevD.97.034005  | 査読の有無<br>有                  |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難  | 国際共著<br>該当する                |

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 4件 / うち国際学会 4件）

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Hideko Nagahiro                                 |
| 2. 発表標題<br>Charmed baryons studied by pion emission decays |
| 3. 学会等名<br>第五回日米物理学会合同核物理分科会（招待講演）（国際学会）                   |
| 4. 発表年<br>2018年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Hideko Nagahiro   |
| 2. 発表標題<br>Pion emission decays of charmed baryon in the quark model |
| 3. 学会等名<br>第11回ストレンジネス核物理を考える会（招待講演）                                 |
| 4. 発表年<br>2018年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Hideko Nagahiro  |
| 2. 発表標題<br>Formation of eta and eta' -mesic nuclei and chiral symmetry in medium. |
| 3. 学会等名<br>RCNP研究会「ガンマ線ビームを用いた原子核・ハドロン物理の新局面と今後の展望」（招待講演）                         |
| 4. 発表年<br>2019年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>川本彩乃、永廣秀子、比連崎悟                                 |
| 2. 発表標題<br>強いエネルギー依存性をもつ $\sigma$ (958) 中間子原子核ポテンシャルと束縛状態 |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会分科会                                      |
| 4. 発表年<br>2017年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Hideko Nagahiro   |
| 2. 発表標題<br>Structure of excited charmed baryons studied by pion emission decays                          |
| 3. 学会等名<br>XVII International Conference on Hadron Spectroscopy and Structure (Hadron2017) (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2017年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Hideko Nagahiro   |
| 2. 発表標題<br>Structure of excited charmed baryons studied by pion emission decays        |
| 3. 学会等名<br>6th International Conference on New Frontiers in Physics (ICNFP2017) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2017年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Hideko Nagahiro   |
| 2. 発表標題<br>Formation of eta'-mesic nuclei for the study of eta'N interaction     |
| 3. 学会等名<br>Reimei Workshop "Hadronic Resonances and Dense Nuclear Matter" (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2017年  |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

|  | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号) | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号) | 備考 |
|--|---------------------------|-----------------------|----|
|  |                           |                       |    |